



JEOTERMAL ENERJİ SANTRALLERİNİN (JES) PROJELENDİRİLMESİNDE OLUŞMASI MUHTEMEL RİSKLERİN ANALİZ EDİLMESİ

¹Eray CAN , ²Hülya KESKİN ÇİTİROĞLU , ³Deniz ARCA 

¹Yalova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Ulaştırma Mühendisliği Bölümü, Yalova, TÜRKİYE

²Yatırım İzleme ve Koordinasyon Başkanlığı, YİKOB, Aydın, TÜRKİYE

³Dokuz Eylül Üniversitesi İzmir MYO, Mimarlık ve Şehir Planlama Bölümü, İzmir, TÜRKİYE

¹can.eray@hotmail.com, ²keskinhc@yahoo.com, ³deniz.arca@deu.edu.tr

Geliş/Received: 29.01.2022; Kabul/Accepted in Revised Form: 22.08.2022

ÖZ: Günümüz koşullarında fosil yakıtların hem hızla tükenmeye başlaması hem de maliyetlerinin yüksek olması ve çevresel kaygılar nedenleriyle, enerji üretiminde yenilenebilir enerji kaynaklarına daha hızlı bir yönelim olmaktadır. İnsanoğlu, yirminci yüzyılın başlarından itibaren yenilenebilir enerji kaynaklarından güç üretme yeteneği kazanmış olup, yenilenebilir enerji kaynaklarından biri olan jeotermal enerji günümüzde üzerine çaba harcanan enerji kaynaklarından biri haline gelmiştir. Yenilenebilir ve sürdürülebilir enerji kaynaklarından biri olan jeotermal enerji santrallerinin (JES) projelendirilmesi yapılırken, karşılaşılabilecek olası risklerin belirlenmesi ve bu risklere karşı önlem alınması; planlanan santralin güvenliği, verimi, kullanım ömrü, proje maliyetinin belirlendiği düzeyde kalması ve elektrik enerjisi üretiminde sürdürülebilirliğin sağlanması açılarından olumlu etkilere sahiptir. Bu nedenle bu çalışmada JES kurulumunda veya projelendirilmesinde karşılaşılabilecek hata ve riskler, sırasıyla Hata Türü ve Etkileri Analizi (HTEA), Pareto ve Analitik hiyerarşi prosesi (AHP) sistematğinde araştırılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Jeotermal enerjisi santrali (JES), Hata Türü ve Etkileri Analizi (HTEA), Pareto Analizi, Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP)

Analysis of Possible Risks in the Project of Geothermal Power Plants (GPP)

ABSTRACT: In today's conditions, there is a faster trend towards renewable energy sources in energy production owing to the quickly consuming of fossil combustibles, their high costs and environmental concerns. Mankind has gained the ability to generate power from sources of renewable energy until now the early of the twentieth century, and geothermal energy has become one of the energy sources on which efforts are made today. During the design of geothermal power plants (GPP), that is one of the sources of sustainable and renewable energy, determining the possible risks that may be encountered and taking precautions against these risks; It has positive effects in terms of safety, efficiency, useful life of the planned power plant, keeping the project cost at the determined level and ensuring sustainability in electrical energy production. Therefore, the failures that may be met in the installation or design of GPP; Failure Mode and Effects Analysis (FMEA), Pareto and Analytical Hierarchy Process (AHP) systematics were searched and their outcomes were matched in this study.

Keywords: Geothermal Power Plant (GPP), Failure Mode and Effects Analysis (FMEA), Pareto Analysis, Analytic Hierarchy Process (AHP)

GİRİŞ (INTRODUCTION)

Jeotermal enerji hem doğrudan termal kullanım hem de elektrik enerjisi üretme olasılığı olduğundan stratejik bir kaynak olarak kabul edilir (Franco ve Donatini, 2017). Yenilenebilir enerji, düşük karbon ekonomisine geçişte ve güvenli bir enerji arzının sağlanmasında kilit rol oynamaktadır. Bu nedenle, jeotermal enerji, popüler talebi karşılayan bir yenilenebilir enerji biçimi olarak çok yönlü bir kaynaktır (Feili ve diğ., 2013). Jeotermal kullanım genel olarak elektrik enerjisi üretimi ve doğrudan kullanım olmak üzere iki kategoriye ayrılır (Gökçen ve diğ., 2004). Doğrudan kullanım uygulama alanları yüzme, banyo ve balneoloji, ısıtma ve soğutma, tarım uygulamaları, su ürünleri uygulamaları, endüstriyel işlemler ve ısı pompaları olarak sıralanabilir (Lund, 1997). Jeotermal enerji kullanılarak elektrik üreten jeotermal enerji santrallerinin (JES) tercih edilmesiyle ilgili olarak;

- Jeotermalin yenilenebilir, sürdürülebilir ve tükenmeyen enerji olması,
- Jeotermal enerjinin temiz ve yanma teknolojisi kullanılmaması sebebiyle sığa yakın emisyon değeri sayesinde çevre dostu olması,
- Jeotermal enerjinin birden fazla amaçlı ve entegre uygulamalara (elektrik üretimi, endüstri, tarım, konut ve sera ısıtması vs) uygun olması,
- Meteorolojik şartlardan etkisinde olmaması,
- Diğer alternatif ve fosil enerji kaynaklarına kıyasla belirgin şekilde ucuz olması,
- Jeotermal arama kuyularının, hem üretim hem de reenjeksiyon amaçlı kullanıma yönelik dönüştürülebilir olması,
- JES ile elektrik üretiminde, üretim (yük) faktörünün %95'den fazla olması,
- JES'lerin alan ihtiyacının hidro, güneş gibi diğer alternatif enerji kaynaklarının aksine minimum olması,

JES tesislerinin çabuk ve kolay devreye alınması, uzun tesisat ömrüne sahip olmaları (TJD, 2021) başlıca sayılabilecek sebeplerin arasında gelmektedir. Dünya elektrik üretimi incelendiğinde, yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen elektrik üretiminin dünya toplam elektrik üretimi içinde %27,3 yer kapladığı görülürken, bu oranının sadece %0,4'ü JES'lerden sağlanmaktadır (REN21, 2020). Jeotermal enerjiden elektrik üreten santrallerin plan-proje, kurulum, devreye alma ve santralin işletilmesi aşamalarının tümünde, kurulum yapılacak sahanın santral projesi ile uyumu büyük önem arz etmektedir. Elektrik enerjisi üretiminde sürdürülebilirlik de ayrıca önemli bir konudur. Yenilenebilir bir enerji kaynağı sürdürülebilirliği sağlanmadığı sürece tamamen faydalanılabilen bir enerji kaynağı olmayacağından dolayı elektrik enerjisi üretiminde de sürdürülebilirlik gerçekleştirilemeyecektir (Şimşek, 2014). Bu nedenle yenilenebilir enerji kaynaklarının tümünde olduğu gibi jeotermal enerji kullanarak elektrik enerjisi üretiminde karşılaşılabilecek riskler, hatalar ve sorunlar net bir şekilde ortaya konulmalı, analiz edilmeli ve çözüm önerileri belirlenerek bu risk ve hataların oluşmadan önüne geçilmelidir. JES projelendirilmesi yapılırken, karşılaşılabilecek olası risklerin belirlenmesi ve bu risklere karşı önlem alınması; planlanan santralin güvenliği, verimi, kullanım ömrü, proje maliyetinin belirlendiği düzeyde kalması ve elektrik enerjisi üretiminde sürdürülebilirliğin sağlanması açılarından olumlu etkilere sahiptir. Ayrıca JES kurulumlarının artan karmaşıklığı ve daha yüksek güvenilirlik seviyeleri sağlanması için artan kamuoyu bilinci, güvenilirlik ve ekonomik olarak uygulanabilirlik sağlanması için yenilikçi çözümler bulmayı gerekli kılmaktadır (Nasruddin ve diğ., 2018). Bu nedenle bu çalışmada JES kurulumunda karşılaşılabilecek risk ve hataların araştırılması, Hata Türü ve Etkileri (HTEA) ile Pareto Analizleri ve Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP) sistematüğünde yapılarak sonuçlar karşılaştırılmıştır. Literatür çalışmalarında yenilenebilir enerji kaynaklarını kullanarak elektrik enerjisi üretimini amaçlayan projelerde oluşabilecek risklerin tespit edilmesi ve verimin arttırılmasına yönelik araştırmalar görülmektedir. Koeh ve arkadaşları risk öncelik sayısı (RÖS) ve HTEA tekniklerini kullanarak Kenya'da Olkaria 2 JES'de ekipman arıza durumlarının risk değerlendirmesini yaptıkları çalışmalarında sık arızalanan kritik alt sistemlerin neler olduğunu ve arıza maliyetlerini ortaya koymuşlardır (Koeh ve diğ., 2018). Feili ve arkadaşları JES'lerde potansiyel arızaları ortadan kaldırmak veya azaltmak için yaygın arızaları belirlemek, sınıflandırmak ve analiz etmek için uygun bir teknik olarak HTEA kullanılmasının uygun olduğunu vurgulamışlardır (Feili ve diğ., 2013). Zhang ve

arkadaşları risk faktörleri arasındaki etkileşimlerin dikkate alındığı risk önceliğini hesaplamak için HTEA yönteminin yanında, PROMETHEE-II methodunu, Bonferroni Ortalama Operatörü ve Dilsel Z Sayısı'na entegre ederek kullanmayı önermişlerdir (Zhang ve diğ., 2019). Karatop ve arkadaşları Türkiye'de yenilenebilir enerji sektöründe optimum yatırım kararlarının alınabilmesine yönelik çalışmalarında Bulanık AHP, Ortalama Çözümünden Uzaklığa Dayalı Değerlendirme (EDAS) ve Bulanık HTEA yöntemlerini kullanarak yenilenebilir enerji alternatiflerinin risklerini tespit etmişlerdir (Karatop ve diğ., 2021). Nasruddin ve arkadaşları ise HTEA ve RÖS'ü jeotermal buhar türbin sistemlerinin analizinde kullanmışlardır (Nasruddin ve diğ., 2018). Gökçen ve arkadaşları Türkiye, Denizli, Kızıldere jeotermal alanında enerji santralının kurulduğu alanı araştırdıkları çalışmalarında bu alanda karşılaşılan sorunlar ve geliştirilen araştırma projelerini sunmuşlardır (Gökçen ve diğ., 2004). Gürcün ve Petek Aydın şehri özelinde jeotermal enerji ile ilgili olarak yaptıkları çalışmada, SWOT Analizini kullanmışlar ve çalışma sonucunda jeotermal enerjiden, elektrik üretimi amacının yanında eş zamanlı şekilde konut ve sera ısıtmasında da yararlanılması gerektiğini vurgulamışlardır (Gürcün ve Petek, 2021). Bu çalışmada ise JES projelendirme aşamasında oluşması muhtemel risklerle birlikte bu muhtemel risklerin oluşmaması için alınabilecek önlemlerin neler olduğu bu konudaki uzman kişilerin ve akademisyenlerin görüşleri ile literatür araştırmaları dikkate alınarak HTEA sistematiğinde incelenmiştir. Ayrıca araştırılan bu risklerin Pareto analizi kapsamında önem sıralaması yapılarak grafik incelemeleri de gerçekleştirilmiştir. Ayrıca AHP yöntemi ile bu riskler tekrar incelenmiş ve kullanılan yöntemlerden çıkan sonuçların karşılaştırılmaları yapılmıştır. Böylelikle bu konularla ilgili literatüre yeni bir katkı verilmeye çalışılmıştır. Ayrıca bu çalışmayla, bu tür projelerin tasarımı sırasında oluşması muhtemel risklerin ortaya konulması ve bu risklerin meydana gelmeden önce önlemlerinin alınmasıyla birlikte yine bu tür projelerin tasarım aşamasında ekonomik kayıpların önüne geçilmesi hedeflenmiştir.

GEREÇ ve YÖNTEM (MATERIAL and METHOD)

Analizde Kullanılan Risk Parametreleri (Risk Parameters Used in Analysis)

Jeotermal santrallerin tasarlanmasında karşılaşılan hata ve risklerin belirlenmesinde Aksoy ve Şişman tarafından jeotermal santrallerin tasarlanabilmesi için tamamlanması gereken çalışma verileri (Aksoy ve Şişman, 2011) ve ayrıca konuyla alakalı uzman kişilerin de (Harita, Geomatik, Jeoloji, İnşaat, Jeofizik, Makine, Sondaj, Kimya, Hidrojeoloji, Saha ve Kontrol Mühendisleri vb.) görüşleri gözetilerek 10 adet risk tespit edilmiştir. Bu riskler;

- Proses No: J1-Kuyuların, santral ve acil durum havuzlarının yeri ve boru hatlarının geçeceği güzergâhın koordinat ve kotlarının hesabında yapılan hata ve riskler,
- Proses No: J2-Kurulum yapılacak arazinin haritalarının olmaması veya haritalarda eksiklik ve/veya yanlışlık bulunmasından kaynaklanan hata ve riskler (topoğrafik, yerleşim, bitki örtüsü, jeoloji vb.),
- Proses No: J3-Kurulum yapılacak yöreye ait uzun yıllar meteorolojik verilerin (maksimum rüzgâr hızı, hâkim rüzgâr yönü, nem, sıcaklık gibi) belirlenmesinde yapılan hata ve riskler,
- Proses No: J4-Jeolojik, jeofizik, jeoteknik, araştırmalarda (zemin koşulları, sıvılaşma, aktif fay konumları, karstik boşluk, vb.), statik analizlerinde, depremsellik, heyelan riski ve zemin parametrelerinin belirlenmesinde yapılan hata ve riskler,
- Proses No: J5-Üretim ve reenjeksiyon kuyularının akış performans ilişkisi, üretim sıcaklığı, kabuklaşma-korozyon ve jeotermal suların kimyasal özelliklerinin açıklanmasında yapılan hata,
- Proses No: J6-Enerji bağlantı noktasının yeri ve bağlantı gücünün belirlenmesinde yapılan hata ve riskler,
- Proses No: J7-Kurulum yapılacak arazinin ve boru hatlarının geçeceği güzergâhın kadastral ölçüm, mülkiyet/kamulaştırma haritalarında yapılması muhtemel hata ve riskler,
- Proses No: J8-Çevresel etki parametrelerin ölçümlerinde (gürültü, koku, emisyon sınır değerleri vb) ve yoğunlaşmayan gaz miktarı hesabında yapılan hata ve riskler,
- Proses No: J9-Projelendirme aşamasında santralin araziye aplikasyonu için gerekli olan koordinatların yanlış hesaplanmasından kaynaklanan hata ve riskler,

- Proses No: J10-İzinlerin alınmasında yaşanan gecikmelerden kaynaklanan hata ve riskler olarak tespit edilmiştir.

Hata Türü ve Etkileri Analizi (HTEA), Pareto Sistemi ve Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP) (Failure Mode and Effects Analysis (FMEA), Pareto System and Analytical Hierarchy Process (AHP))

JES kurulum projelerinde tespit edilen risklerin analizi için sağlıklı verilerin oluşturulması, standart karşılaştırma kriterlerinin belirlenmesi ve literatürde kabul görmüş ve uygulama sonucunda başarılı olmuş risk analizi yöntemlerinin uygulanması büyük önem taşımaktadır. JES kurulumunda beklenmeyen birçok etkenle karşılaşılabilceğinden dolayı risk analizi; JES kurulumunun zamanında bitirilebilmesi, projenin maliyetinin belirlenmiş düzeyde tutulması, çalışanların sağlıklı ortamda çalışması ve üretimin sürekliliğinin sağlanması açısından büyük önem taşımaktadır.

HTEA, risklerin projeye zararı olmadan tespit edilerek alınması gereken önlemlerin bir an önce hayata geçirilmesi için kullanılan sistematik bir yöntem (Li ve Chen, 2019; Liu ve diğ., 2013; Liu ve diğ., 2021; Akın, 1998) olup literatürde de yaygın olarak kullanılmaktadır (Can, 2019; Liu ve diğ., 2013; Wang ve diğ., 2009; Chin ve diğ., 2009). HTEA, faktör sorunlarına odaklanmakta olup, sorunları faktörün önemine göre çözme prensibine sahiptir (Tsai ve diğ., 2018). HTEA yöntemi uygulandığı projelerde iş kalemlerinin öncelik sıralamasını, risklerin ve etkilerinin belirlemesini ve hataların önüne geçilmesini sağlamaktadır. Yapılan bu çalışmada belirlenen risklerin değerlendirilmesinin yapılabilmesi için HTEA sistematığı içinde yine her bir risk için RÖS hesaplanmıştır. RÖS sayısı belirlenirken her bir riskin olasılığı, ağırlığı (şiddeti) ve tespit edilebilirliği hakkında sayısal değerlendirmeler yapılmıştır. Bu değerlendirmelerde yine konunun uzmanlarından, akademisyenlerden ve literatür araştırmalarından faydalanılmıştır. Buna göre RÖS hesaplanırken her bir risk için olasılık parametresi için 1 ile 10 arasında bir değer bulunmuştur. Riskin olasılığı için değerlendirme;

(Çok Yüksek): Kaçınılmaz Hata, 10-9; (Yüksek): Tekrar Eden Hata, 8-7; (Orta): Ara Sıra Olan Hata, 6-5; (Düşük): Nispeten Olan Hata, 4-3; (Pek az): Olası Olmayan Hata, 2-1 şeklinde olmaktadır (Akın, 1998; Su ve diğ., 2012; Xiao ve diğ., 2011).

Yine RÖS değeri hesaplanırken her bir risk için ağırlık (şiddet) parametresi için 1 ile 10 arasında bir değer bulunmuştur. Riskin ağırlığı (şiddeti) için değerlendirme;

(Uyarısız Gelen Yüksek tehlike): Felakete yol açabilecek etkiye sahip ve uyarısız gelen potansiyel hata-10; (Uyarısız Gelen Tehlike): Yüksek hasara yol açabilecek etkiye sahip ve uyarısız gelen potansiyel hata-9; (Çok Yüksek): Sistemin tamamen hasar görmesini sağlayan yıkıcı etkiye sahip ağır yaralanmalara sebep olabilecek hata türü-8; (Yüksek): Ekipmanın tamamen hasar görmesine neden olan ve ölüme, zehirlenme, 3. derece yanık, akut ölüm vb. etkiye sahip hata türü-7; (Orta): Sistemin performansını etkileyen, uzuv ve organ kaybı, ağır yaralanma, kanser vb. yol açan hata-6; (Düşük): Kırık, kalıcı küçük iş göremezlik, 2. derece yanık, beyin sarsıntısı vb. etkiye sahip hata-5; (Çok Düşük): İncinme, küçük kesik ve sıyrıklar, ezilmeler vb. hafif yaralanmalar ile kısa süreli rahatsızlıklara neden olan hata-4; (Küçük): Sistemin çalışmasını yavaşlatan hata-3; (Çok Küçük): Sistemin çalışmasında kargaşaya yol açan hata-2; (Yok): Etki yok-1 şeklinde olmaktadır (Akın, 1998).

Ayrıca RÖS değeri hesaplanırken her bir risk için saptanabilirlik (tespit edilebilirlik) parametresi için 1 ile 10 arasında bir değer bulunmuştur. Riskin Saptanabilirliği için değerlendirme;

(Fark Edilemez): Potansiyel hatanın nedeninin ve takip eden hatanın saptanabilirliği mümkün değil-10; (Çok Az): Potansiyel hatanın nedeninin ve takip eden hatanın saptanabilirliği çok uzak-9; (Az): Potansiyel hatanın nedeni uzak-8; (Çok Düşük): Potansiyel hatanın nedeninin ve takip eden hatanın saptanabilirliği çok düşük-7; (Düşük): Potansiyel hatanın nedeninin ve takip eden hatanın saptanabilirliği düşük-6; (Orta): Potansiyel hatanın nedeninin ve takip eden hatanın saptanabilirliği orta-5; (Yüksek Ortalama): Potansiyel hatanın nedeninin ve takip eden hatanın saptanabilirliği yüksek ortalama-4; (Yüksek): Potansiyel hatanın nedeninin ve takip eden hatanın saptanabilirliği yüksek-3; (Çok Yüksek): Potansiyel hatanın nedeninin ve takip eden hatanın saptanabilirliği çok yüksek-2; (Hemen hemen kesin): Potansiyel hatanın nedeninin ve takip eden hatanın saptanabilirliği hemen hemen kesin-1; şeklinde yapılmıştır (Akın, 1998).

Bu parametrelere (Olasılık, Ağırlık (Şiddet), Saptanabilirlik) bağlı olarak Risk Öncelik sayısı (RÖS) hesaplanmıştır. RÖS değerleri için ise Denklem (1)'de görüldüğü şekilde yapılmıştır (Nasruddin ve diğ., 2018, Su ve diğ. 2012; Xiao ve diğ. 2011; Wang ve diğ. 2009; Akın, 1998).

$$RÖS = O(\text{olasılık}) * A(\text{ağırlık}) * S(\text{saptanabilirlik}) \quad (1)$$

RÖS sınıflandırması ise;

RÖS değeri <40 ise önlem almaya gerek yok; RÖS değeri $40 \leq RÖS \leq 100$ ise Orta risk önlem alınabilir; RÖS değeri $RÖS > 100$ ise Önlem alınması gereken yüksek risk şeklinde yapılmaktadır (Akın, 1998).

RÖS, karşılaşılabilecek hata ve risklerden hangisinin öncelikli olarak üzerinde durulması gerektiğini belirlemede yardımcı olmasının yanında projenin hata ve risklerden arındırılmasına da yol göstermektedir. Çalışmada İkinci analiz türü olarak Pareto analizi yöntemi kullanılmıştır. Pareto analizi oranlara bağlı olarak hata ve risklerin öncelik durumlarını ve önem derecelerini gösteren bir analiz türü olarak karşımıza çıkmaktadır. (Özcan, 2001). Bu analizde genel oran: %20 risk sayısı ile %80 sınır değeri =%100 oranı olmakla birlikte bu değerler, projedeki risklerin özelliğine ve projenin türüne bağlı olarak %30 risk sayısı ile %70 sınır değeri =%100 oranı, %40 risk sayısı ile %60 sınır değeri =%100 oranları da olabilmektedir. Bu değerlerin anlamı risk sayısının %20'sinin, projedeki toplam risklerin %80'nini meydana getirdiğini ya da risk sayısının %40'ının, projedeki toplam risklerin %60'ını meydana getirdiğini belirtmektedir. Buradaki düşüncede önemli olan bu iki oran toplamının 100 sayısını vermesi olmaktadır. Örneğin bir projede oluşması muhtemel 10 tane riskten %80 değeri ilk 2 riskte oluşmakta ise bu oran %20 risk sayısı ile %80 sınır değeri=%100 oran şeklinde ifade edilmektedir. Yapılan çalışmada ilk olarak bu oranların, projenin ve risklerin türüne bağlı olarak hangisinin uygun olacağına (%20-%80=%100, %30-%70=%100, %40-%60=%100) karar verilmiş ve sonrasında bu oranlarda yapılan analiz ilk alternatif olarak düşünülmüştür. Pareto analizinde temel amaç, az sayıdaki risk faktörüyle problemlerin büyük çoğunluğunun temsil edilmesidir. Bu yöntemle, projelerdeki en önemli olan ve ayrıca bütün projedeki problemlerin büyük bir yüzdesini oluşturan birkaç risk için, az bir maliyetle önlemlerin alınması ve projenin ilerlemesinin zarar görmemesi amaçlanmaktadır. AHP ise belirlenen kriterlerin birbirleriyle kıyaslanmaları sayesinde her bir kriter ağırlığının tespit edilerek önem sıralamasının ortaya konmasında kullanılan çok kriterli karar verme (ÇKKV) yöntemlerinden biri olup, karmaşık karar problemlerinin çözümünde oldukça etkilidir. ÇKKV yöntemi olan AHP'yi Thomas L. Saaty 1980 yılında geliştirmiş (Sarıçalı ve Kundakçı, 2016) olup bu yöntemin, karar süreçlerini öznel ve nesnel yaklaşımlarla değerlendirebilmesi uygulayıcılar tarafından ilgi görmesine neden olmuştur. AHP, problemi ayrıntılı olarak analiz ederek hiyerarşik yapıyı oluşturduğu için bu yöntem diğer ÇKKV yöntemleri içinde daha avantajlı olmaktadır (Min, 1994). AHP'nin pek çok çalışmada, çeşitli amaçlarla kullanıldığı sıklıkla görülmekte olup bu amaçlar uygun seçeneğin belirlenmesi, plan yapma ve geliştirme, kaynakların değerlendirilmesi, en uygun sıralamayı yapabilme, karar verme, kestirim yapma şeklinde sıralanabilir (Vaidya ve Kumar, 2006). AHP'de ana hedef, hiyerarşik bir düzen içinde kriterlerin ve bu kriterlerin alt kriterlerinin ve alternatiflerinin hazırlanması ile başlar. Bunun için, ilk olarak amaç tespit edilerek, seçim üzerinde etken olan elemanlar belirlenir. Seçime tesir eden faktörlerin tespitinde konuda uzman kişilerin görüşlerinden ve/veya anketlerden yararlanılabilir. Tespit edilen tüm faktörler göz önüne alındığında da olası alternatifler ortaya konulur (Saaty, 1980). Belirlenen kriterler arasında kurulan hiyerarşik yapıdan sonra ikili karşılaştırma matrisi oluşturulması aşaması gelmektedir. Belirlenen kriterlerin ikili karşılaştırmalarının gerçekleştirilmesinde, Saaty tarafından önerilen ve 1'den 9'a kadar önem derecesi ile bu önem derecelerine karşılık gelen eşit derece önemden aşırı yüksek öneme uzanan bir ölçekten yararlanılmaktadır (Saaty, 1980). Daha sonra kriter ağırlıklarının tespit edilmesi ve Tutarlılık Oranı (CR) hesaplamasının yapılması aşaması gelmektedir (Mutlu ve Sarı, 2017). CR'nin hesaplanabilmesi için öncelikle Denklem (2)'de görülen Tutarlılık İndeksi (CI) değerinin bulunması gereklidir.

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (2)$$

CR'nin tespitinde kullanılan bir diğer parametre olan Rastgele İndeks (RI) ise karar alternatiflerinin sayısına karşılık gelen bir değer olup Çizelge 1'de görülmektedir (Saaty, 2013). CI'nin RI'ne bölünmesi ile de CR hesaplanmaktadır. Hesaplanan CR, 0,10 değerinden fazla olduğunda karşılaştırma matrisinin

tekrar ele alınması gereklidir. Hesaplanan CR, 0,10 değerinden düşük ise bu durum karar matrisinin doğruluğunu ispatlamaktadır (Saaty, 2000).

Çizelge 1. 15 eleman için RI sayıları (Saaty, 2013)

Table 1. RI numbers for 15 elements (Saaty, 2013)

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
RI	0	0	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49	1,51	1,53	1,56	1,57	1,59

3. BULGULAR (RESULTS)

JES kurulumunun planlandığı alanın konumuna göre hava koşulları, hâkim rüzgâr yönü, reenjesiyon kuyuları ile üretim kuyularının lokasyonları, akış ve performans ilişkisi, üretim sıcaklığı, kabuklaşma-korozyon ve jeotermal suların kimyasal özellikleri gibi parametreler, kurulacak santralden elde edilecek enerjinin miktarını ve sürdürülebilirliğini doğrudan etkilediğinden dolayı en önemli kriterler arasında olmaktadır. Bununla birlikte, JES kurulumunda, projenin yerleşeceği arazinin güncel, detaylı ve hassas harita, plan ve kesitlerin bulunması, 3 boyutlu sayısal yükseklik modellerinin hazırlanması gereklidir. Bu nedenlerle de JES kurulumunun planlandığı arazinin eğim ve bakı yönüne göre simülasyonlarının yapılması da ayrıca önem arz etmektedir. Bu çalışmanın ilk aşamasında, JES tasarımı yürütülürken oluşabilecek risklerden doğacak olumsuzlukların önceden tanımlanması amacıyla jeotermal santraller konusunda bilgi sahiplerinin de (harita, geomatik, jeoloji, inşaat, jeofizik, makine, sondaj, kimya, hidrojeoloji, saha ve kontrol mühendisleri vb.) görüşleri gözetilerek, bu aşamada hangi hata ve risklerle karşılaşıldığı araştırılmıştır. Araştırma sonucunda tespit edilen 10 adet risk (Proses No: J1-J10), HTEA sistematğinde incelenmiştir. Çalışmanın İkinci aşamasında ise hata ve risklerin belirlenmesinde olduğu gibi aynı şekilde JES kurulumu konusunda uzmanların önerileri ve fikirleri dikkate alınarak belirlenen bu hata ve risklerin oluşma olasılığı (O), şiddeti (ağırlığı) (A) ve saptanabilirliği (S) birlikte ele alınarak RÖS puanı belirlenmiştir. Daha sonra ise riskin hangi risk grubuna ait olduğu tespit edilmiştir. Oluşma olasılığı belirlenen hata ve risklerin meydana gelmemesi amacıyla da uygulanması gereken önlemler gözetilerek RÖS sayıları tekrar değerlendirilmiştir. Önlemlerin uygulanması ile bu hata ve risklerin, düşük risk grubuna dâhil olduğu görülmüştür (Çizelge 2).

Çalışmanın üçüncü aşamasında, belirlenmiş olan hata ve risklerin önem ve öncelik sıralarını belirleyebilmek için Pareto Analiz sistematığı uygulanmıştır. Çalışmada iki alternatif düşünülmüş olup ilk alternatif %40 Risk Sayısı ile %60 Sınır Değeri=%100 Oranı ve İkinci alternatif ise %80 Sınır Değeri Projeledeki hangi riskte elde edildiği şeklindedir (Çizelge 3, Şekil 1). İlk alternatif olarak, Uygulanan Pareto Analizine göre %20-%80=%100, %30-%70=%100, %40-%60=%100 oranlarından, %40 Risk Sayısı ile %60 Sınır Değeri=%100 oranı, (toplamın %100 olması önemsenmektedir.) bu projeye ve bu projedeki oluşması muhtemel risklerin RÖS sayılarına göre uygun bir oran olarak düşünülmüştür. Buna göre J4,J9,J2,J1 risklerinin JES kurulum projelerinde ön plana çıktığı görülmüştür. Bu birinci alternatif ile JES kurulum aşamasında belirlenen risklerin %40'ının, projedeki tüm problemlerin %60'ını oluşturduğu şeklinde yorum yapılabilir. Toplam 10 adet riskten ilk 4 tane risk bu projedeki risklerin %60'ını oluşturmakta olup genel toplam oranı burada %100 olmaktadır. (Çizelge 3, Şekil 1). J4,J9,J2,J1 riskleri kendi içinde yine %60 sınır değerine göre ikinci bir pareto analizinde incelendiğinde ise J4,J9 risklerinin ön plana çıktığı görülmektedir (Çizelge 4, Şekil 2).

Çizelge 2. Jeotermal enerji santrallerinin projelendirilmesinde oluşması muhtemel risklerin HTEA sistematğinde incelenmesi

Table 2. Investigation of possible risks in project design of geothermal power plants in FMEA systematic

JEOTERMAL ENERJİ SANTRALLERİNİN PROJELENDİRİLMESİNDE OLUŞMASI MUHTEMEL RİSKLERİN SİSTEMATİK OLARAK TESPİT EDİLMESİ										HTEA FORMU								
Proses Adımları	OLASILIK		ŞİDDET		TESPİT EDİLEBİLİRLİK					RÖS DEĞERİ (Risk Öncelik Sayısı)								
	1-2 Pek az	1-2 Çok hafif	3-4 Düşük	3-4 Hafif	1. Kesin	2. Çok yüksek	3. Yüksek	4. Yüksek Ortalama	5. Orta	6. Düşük seviye	7. Çok Düşük	8. Az Seviye	9. Çok az seviye	10. Fark edilemez	ROS<40 Onlem almaya gerek yok. DÜŞÜK RISK	40< ROS ≤100 Onlem alınabilir ORTA RISK	ROS >100 Onlem alınması gerektirir. YÜKSEK RISK	
	5-6 Orta	5-6 Orta	7-8 Yüksek	7-8 Ciddi											RISK DEĞERLENDİRMESİ			
	HATANIN POTANSİYEL NEDENLERİ		RISK DEĞERLENDİRMESİ					KONTROL ÖNEMİ					RISK DEĞERLENDİRMESİ					
	Hata	Referans	OlASILIK	ŞİDDET	Tespit Edilebilirlik	R.Ö.S	Önem						SORUMLULUK	OlASILIK	ŞİDDET	Tespit Edilebilirlik	R.Ö.S	Önem
J.1	Kuyuların, santral ve acil durum havuzlarının yeri ve boru hatlarının geçeceği güzergahın koordinat ve kotlarının hesabında yapılan hata ve riskler	Büyük Ölçekli Harita ve Harita Bilgilerinin Üretim Yönetmeliği, Elektrik Tesisleri Proje Yönetmeliği, Jeoloji ve jeoteknik çalışmalar ile ilgili yönetmelik ve düzenlemeler	6	8	5	240	YÜKSEK RISK	Santral yeri, belirlenen üretim ve reenjeksiyon kuyularının konularına göre belirlenmeli, birkaç seçeneği güzergah belirlemesi yapılarak fayda-maliyet analizi ile karar verilmelidir. Uygun yer ve derinlikte seçilen reenjeksiyon kuyularında, önceden enjeksiyon testleri yapılmalı, acil durum havuzları yeterli kapasitede inşa edilmelidir. Güzergah tespitlerinde Coğrafi Bilgi Sistemleri Analizlerinden faydalanılmalıdır. Tespit edilen koordinat hataları hemen düzeltilmelidir.					Jeoloji, Harita (Geomatik), Sondaj, Jeofizik, İnşaat ve Makine Mühendisleri	3	4	2	24	DÜŞÜK RISK
J.2	Kurulum yapılacak arazinin haritalarının olmaması veya haritalarda eksiklik ve/veya yanlışlık bulunmasından kaynaklanan hata ve riskler (topoğrafik, yerleşim, bitki örtüsü, jeoloji vb.)	Büyük Ölçekli Harita ve Harita Bilgilerinin Üretim Yönetmeliği	6	9	5	270	YÜKSEK RISK	Kurulum yapılacak olan arazide haritalarda oluşacak olan hata ve eksiklikler yersel, hava fotoğrafı (fotogrametri) ya da uzaktan algılama sistemleri kullanılarak giderilmeli ve tamamlanmalıdır. Bu ölçümler Coğrafi Bilgi Sistemlerine uyumlu hale getirilmeli ve bir çok veriyi içeren haritasal veriler birleştirme analizleri kullanılarak bir bütün halinde değerlendirilmelidir. Topoğrafik Ölçümler hata sınırları dışında kalyorsa bu ölçümler arazide kontrol edilmeli ve tekrarlanmalıdır.					Harita (Geomatik) ve Jeoloji Mühendisleri	3	5	2	30	DÜŞÜK RISK
J.3	Bölgenin uzun dönem ortalama sıcaklık, nem, hakim rüzgar yönü ve maksimum rüzgar hızı verilerinin belirlenmesinde yapılan hata ve riskler	Meteorolojik veri değerlendirilmesi ile ilgili yönetmelik ve düzenlemeler	5	7	4	140	YÜKSEK RISK	Kurulum yapılacak bölgenin sıcaklık, nem, rüzgar hızı ve rüzgar yönü hesaplanmalı, uzun yıllar meteorolojik veriler sağlığı olarak elde edilmeli, ortalama atmosferik koşullar dikkate alınmalıdır.					Meteoroloji ve Proje Yönetim Mühendisleri	2	3	2	12	DÜŞÜK RISK
J.4	Jeolojik, jeofizik, jeoteknik, araştırmalarda (zemin koşulları, sivilaşma, aktif fay konumları, karstik boşluk, vb.), statik analizlerinde, depremsellik, heyelan riski ve zemin parametrelerinin belirlenmesinde yapılan hata ve riskler	Jeolojik harita, Jeoloji ve jeofizik çalışmalar ile ilgili yönetmelik ve düzenlemeler	7	8	6	336	YÜKSEK RISK	Santral alanı ve çevresinin stratigrafik, litolojik, jeolojik özellikleri açıklanmalı, harita ve kesitleri yapılmalı, araştırma çukuru ve jeofizik yöntemler kullanılarak gerekirse kuyu veya sondaj açılarak zemin ve yer altı durumu açıklanmalıdır. Laboratuvar testleri sonuçlarına göre zemin/toprak yapısı, özellikleri ve kimyasal yapısı ile yeraltı su seviyesi belirlenmelidir. Santral inşasına esas mimari projeler, santrale ait soğutma kuleleri, jeneratör ve türbin ağırlıklarına ve zemin etüt parametrelerine göre statik projeleri hazırlanmalıdır.					Jeoloji, Jeofizik, İnşaat ve Saha Mühendisleri	4	4	2	32	DÜŞÜK RISK
J.5	Üretim ve reenjeksiyon kuyularının akış performans ilişkisi, üretim sıcaklığı, kabuklaşma-korozyon ve jeotermal suların kimyasal özelliklerinin açıklanmasında yapılan hata ve riskler	Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Elektrik Enerjisi Üretimi Amaçlı Kullanımı mevzuatı, ilgili kimyasal analizlerle ilgili standartlar.	5	8	5	200	YÜKSEK RISK	Üretim ve reenjeksiyon kuyularının kuyubası basıncı ve üretim/enjeksiyon debisi arasındaki ilişki, ortalama akış sıcaklığı ve kuyu akış performansı belirlenmelidir. Kaynak sıcaklığına uygun santral türü seçilmeli, santral devreye alınmasından önce, uygun inhibitör ve kullanım oranları belirlenmeli, su analizleri kuyubasında gerçekleştirilmelidir.					Jeoloji, Geomatik, Sondaj, Kimya, Hidrojeoloji, Makine Mühendisleri	3	4	2	24	DÜŞÜK RISK
J.6	Enerji bağlantı noktasının yeri ve bağlantı gücünün belirlenmesinde yapılan hata ve riskler	Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Elektrik Enerjisi Üretimi Amaçlı Kullanımı ve Elektrik Piyasası ile ilgili yönetmelik ve düzenlemeler	6	8	4	192	YÜKSEK RISK	Bağlantı noktasının türü, santral kurulu gücüne bağlı olarak belirlenmeli, buna bağlı olarak elektrik projeleri hazırlanmalıdır. Enerji iletim hattını ve bağlantı noktasını gösteren tek ve hat şemasıyla ilgili kurumlara başvuru yapılmalıdır. Projeler Coğrafi Bilgi sistemleri ortamında değerlendirilmelidir.					Elektrik, Enerji, Makine ve Proje Yönetim Mühendisleri	3	5	2	30	DÜŞÜK RISK
J.7	Kurulum yapılacak arazinin ve boru hatlarının geçeceği güzergahın kadastral ölçüm, mülkiyet/kamulaştırma haritalarında yapılması muhtemel hata ve riskler	Büyük Ölçekli Harita ve Harita Bilgilerinin Üretim Yönetmeliği Kamulaştırma ile ilgili kanun ve yönetmelikler	6	9	4	216	YÜKSEK RISK	Kurulum yapılacak olan arazinin kadastral mülkiyet ve kamulaştırma haritalarında hatalı kısımların tekrar ölçümleri yapılmalı ve haritalara yansıtılmalıdır. Santral yeri ve güzergahı seçimlerinde Coğrafi Bilgi Sistemleri ortamında kamulaştırma analizleri yapılmalıdır.					Harita (Geomatik), Yazılım, Saha ve Proje Yönetim Mühendisleri, CBS uzmanları Mali uzmanlar	3	6	2	36	DÜŞÜK RISK
J.8	Çevresel etki parametrelerinin ölçümlerinde (gürültü, koku, emisyon sınır değerleri vb) ve yoğunlaşmayan gaz miktarı hesabında yapılan hata ve riskler	Çevresel Etki Değerlendirmesi ve Proje teknik ve idari şartnameleri ile ilgili mevzuat	6	6	3	108	YÜKSEK RISK	Santralin çalışması sırasında gürültü ve koku engelleyici filtreler tasarlanmalı, baca yükseklik ve filtreleri projelendirilmeli, meteorolojik koşullar dikkate alınmalı düzenli olarak saha izlemesi ve analizler yapılmalıdır. Yoğunlaşmayan gaz miktarının hassas şekilde bilinmesi ve bertarafı gerekmektedir.					Çevre, Kimya, Makine, İnşaat ve Saha Mühendisleri	3	3	2	18	DÜŞÜK RISK
J.9	Projelendirme aşamasında santralin araziye uygulaması için gerekli olan koordinatların yanlış hesaplanmasından kaynaklanan hata ve riskler	Büyük Ölçekli Harita ve Harita Bilgilerinin Üretim Yönetmeliği	6	9	6	324	YÜKSEK RISK	Santralin araziye uygulamasında hesaplanan koordinatlar için faydalanılan arazi ölçme ağındaki yer kontrol noktalarının koordinatları tekrar hesaplanmalı ve yeni hesaplanan bu koordinatlara göre santral uygulaması noktalarının koordinatları kontrol edilmeli ve tekrar hesaplanmalıdır.					Harita (Geomatik) Mühendisleri	2	4	4	32	DÜŞÜK RISK
J.10	İzlinin alınmasında yaşanan gecikmelerden kaynaklanan hata ve riskler	Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Elektrik Enerjisi Üretimi Amaçlı Kullanımı, Enerji Piyasası Düzeltme Kurumu, Jeotermal Kaynaklar ve Doğal Minerali Sular ve Başvuruların Teknik Değerlendirilmesine ilişkin mevzuatlar ve ilgili Kamu Kurumlarının yönetmelikleri	4	7	4	112	YÜKSEK RISK	Başvurunun yapıldığı ilgili kamu kurum ve kuruluşlarından izinlerinin alınması, Projelendirilmesini yapıp onaylatılması, Kurulum ve kuyu bağlantılarının tanınanmasından sonra tesisin resmi kurumlara kabulünün yaptırılması gerekmektedir.					Proje Yönetim Mühendisleri Kontrol Mühendisleri	2	3	2	12	DÜŞÜK RISK

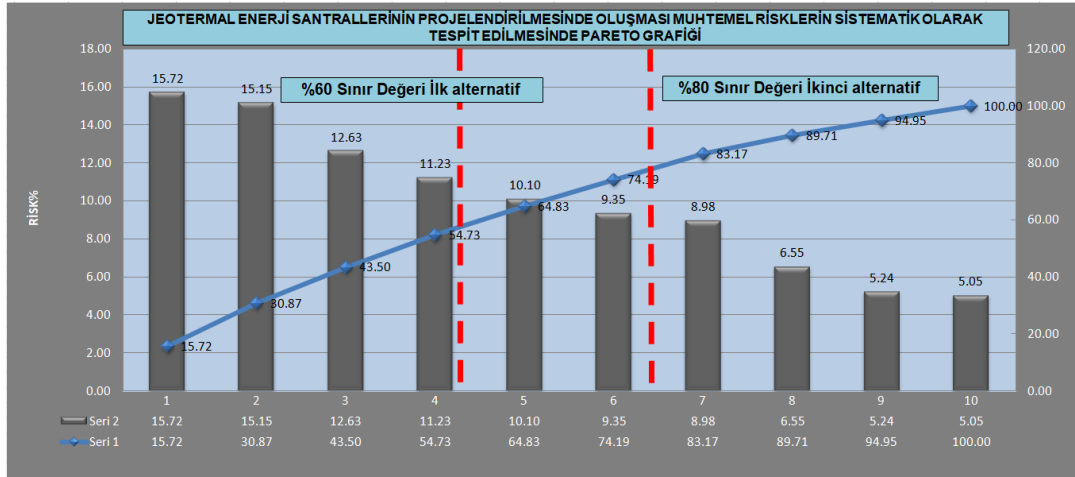
Çizelge 3. JES Projelendirilmesinde oluşması muhtemel risklerin 1. aşama Pareto sistematığında incelenmesi ((ilk alternatif %40 risk sayısı ile %60 sınır değeri=%100 oranı) ve (ikinci alternatif %80 sınır değerinin elde edildiği risk sayısı) birlikte)

Table 3. Examining the possible risks to the GPP project design in the 1st stage Pareto systematic ((first alternative 40% risk number and 60% limit value=100% ratio) and (second alternative risk number where 80% limit value is obtained) together)

JEOTERMAL ENERJİ SANTRALLERİNİN PROJELENDİRİLMESİNDE OLUŞMASI MUHTEMEL RİSKLERİN SİSTEMATİK OLARAK TESPİT EDİLMESİ (%40 Risk Sayısı ile %60 Sınır Değeri=%100 Oranı) VE (%80 sınır değerinin elde edildiği risk sayısı) BİRLİKTE						
SIRA NO	HATA ŞEKLİ	PROSES NO	RÖS DEĞERİ	RISK(%)	KÜMÜLATİF RİSK %	RİSK
1	Jeolojik, jeofizik, jeoteknik, araştırmalarda (zemin koşulları, sıvılaşma, aktif fay konumları, karstik boşluk, vb.), statik analizlerinde, depremsellik, heyelan riski ve zemin parametrelerinin belirlenmesinde yapılan hata ve riskler	J.4	336	15.72	15.72	YÜKSEK RİSK
2	Projelendirme aşamasında santralin araziye uygulaması için gerekli olan koordinatların yanlış hesaplanmasından kaynaklanan hata ve riskler	J.9	324	15.15	30.87	YÜKSEK RİSK
3	Kurulum yapılacak arazinin haritalarının olmaması veya haritalarda eksiklik ve/veya yanlışlık bulunmasından kaynaklanan hata ve riskler (topografik, yerleşim, bitki örtüsü, jeoloji vb.)	J.2	270	12.63	43.50	YÜKSEK RİSK
4	Kuyuların, santral ve acil durum havuzlarının yeri ve boru hatlarının geçeceği güzergahın koordinat ve kotlarının hesabında yapılan hata ve riskler	J.1	240	11.23	54.73	YÜKSEK RİSK
5	Kurulum yapılacak arazinin ve boru hatlarının geçeceği güzergahın kadastral ölçüm, mülkiyet/kamulaştırma ölçümlerinde yapılan hata ve riskler	J.7	216	10.10	64.83	YÜKSEK RİSK
6	Üretim ve reenjeksiyon kuyularının akış performans ilişkisi, üretim sıcaklığı, kabuklaşma-korozyon ve jeotermal suların kimyasal özelliklerinin açıklanmasında yapılan hata ve riskler	J.5	200	9.35	74.19	YÜKSEK RİSK
7	Enerji bağlantı noktasının yeri ve bağlantı gücünün belirlenmesinde yapılan hata ve riskler	J.6	192	8.98	83.17	YÜKSEK RİSK
8	Bölgenin uzun dönem ortalama sıcaklık, nem, hakim rüzgar yönü ve maksimum rüzgar hızı verilerinin belirlenmesinde yapılan hata ve riskler	J.3	140	6.55	89.71	YÜKSEK RİSK
9	İzinlerin alınmasında yaşanan gecikmelerden kaynaklanan hata ve riskler	J.10	112	5.24	94.95	YÜKSEK RİSK
10	Çevresel etki parametrelerinin ölçümlerinde (gürültü, koku, emisyon sınır değerleri vb) ve yoğunlaşmayan gaz miktarı hesabında yapılan hata ve riskler	J.8	108	5.05	100.00	YÜKSEK RİSK

(İlk alternatif %40 Risk Sayısı ile %60 Sınır Değeri =%100 Oranı)

(İkinci alternatif %80 sınır değerinin elde edildiği risk sayısı)



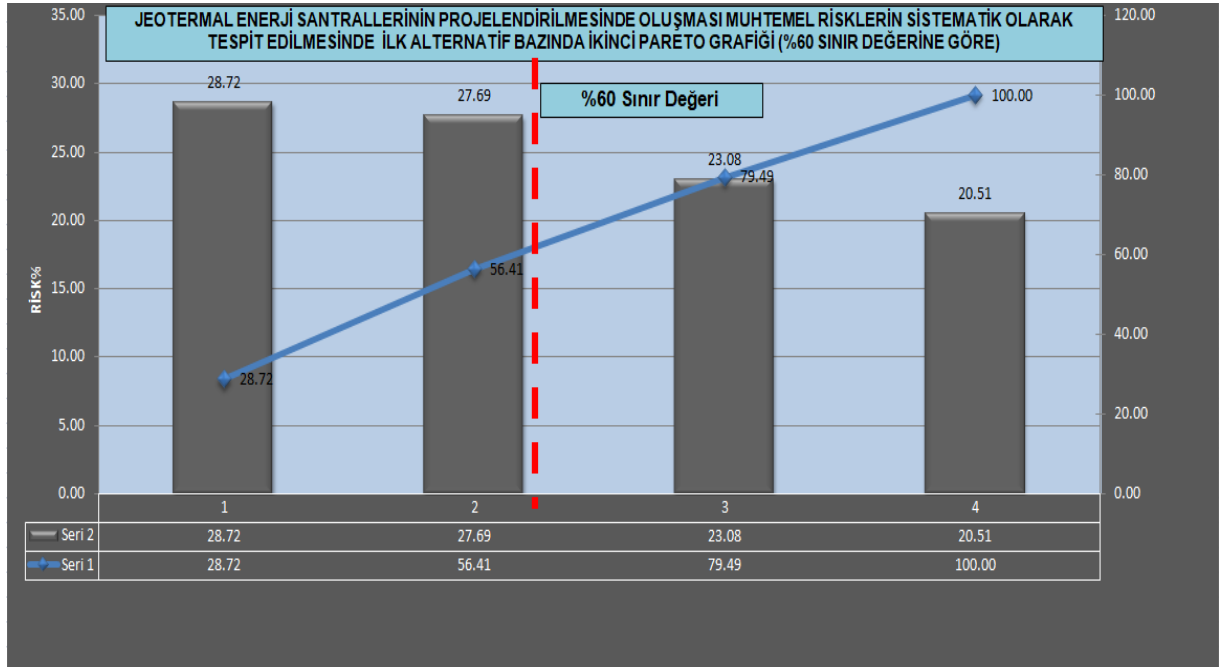
Şekil 1. Jeotermal enerji santrallerinin projelendirilmesinde oluşması muhtemel risklerin Pareto sistematiğindeki grafik gösterimin ((ilk alternatif %40 risk sayısı ile %60 sınır değeri=%100 oranı) ve (ikinci alternatif %80 sınır değerinin elde edildiği risk sayısı) birlikte)

Figure 1. Graphic display of possible risks in the project design of geothermal power plants in Pareto system ((first alternative 40% Risk number and 60% limit value=100% ratio) and (second alternative 80% limit value obtained risk number))

Çizelge 4. Jeotermal enerji santrallerinin projelendirilmesinde oluşması muhtemel risklerin ilk alternatif bazında ikinci Pareto sistematiğinde incelenmesi (%60 sınır değeri)

Table 4. Examination of possible risks in the design of geothermal power plants in the second Pareto system based on the first alternative (60% limit value)

JEOTERMAL ENERJİ SANTRALLERİNİN PROJELENDİRİLMESİNDE OLUŞMASI MUHTEMEL RİSKLERİN İLK ALTERNATİF BAZINDA İKİNCİ PARETO SİSTEMATİĞİNDE İNCELENMESİ (%60 Sınır Değeri)						
SIRA NO	HATA ŞEKLİ	'ROSES Nı	RÖS DEğERİ	RİSK(%)	KÜMÜLATİF RİSK %	RİSK
1	Jeolojik, jeofizik, jeoteknik, araştırmalarda (zemin koşulları, sıvılaşma, aktif fay konumları, karstik boşluk, vb.), statik analizlerinde, depremsellik, heyelan riski ve zemin parametrelerinin belirlenmesinde yapılan hata ve riskler	J.4	336	28.72	28.72	YÜKSEK RİSK
2	Projelendirme aşamasında santralin araziye uygulaması için gerekli olan koordinatların yanlış hesaplanmasından kaynaklanan hata ve riskler	J9	324	27.69	56.41	YÜKSEK RİSK
(%60 Sınır Değerine Göre)						
3	Kurulum yapılacak arazinin haritalarının olmaması veya haritalarda eksiklik ve/veya yanlışlık bulunmasından kaynaklanan hata ve riskler (topoğrafik, yerleşim, bitki örtüsü, jeoloji vb.)	J.2	270	23.08	79.49	YÜKSEK RİSK
4	Kuyuların, santral ve acil durum havuzlarının yeri ve boru hatlarının geçeceği güzergahın koordinat ve kotlarının hesabında yapılan hata ve riskler	J.1	240	20.51	100.00	YÜKSEK RİSK



Şekil 2. Jeotermal enerji santrallerinin projelendirilmesinde oluşması muhtemel risklerin ilk alternatif bazında ikinci Pareto sistematığındeki grafik gösterimi (%60 sınır değeri)

Figure 2. Graphic display of possible risks in the design of geothermal power plants in the second Pareto systemic based on the first alternative (60% limit value)

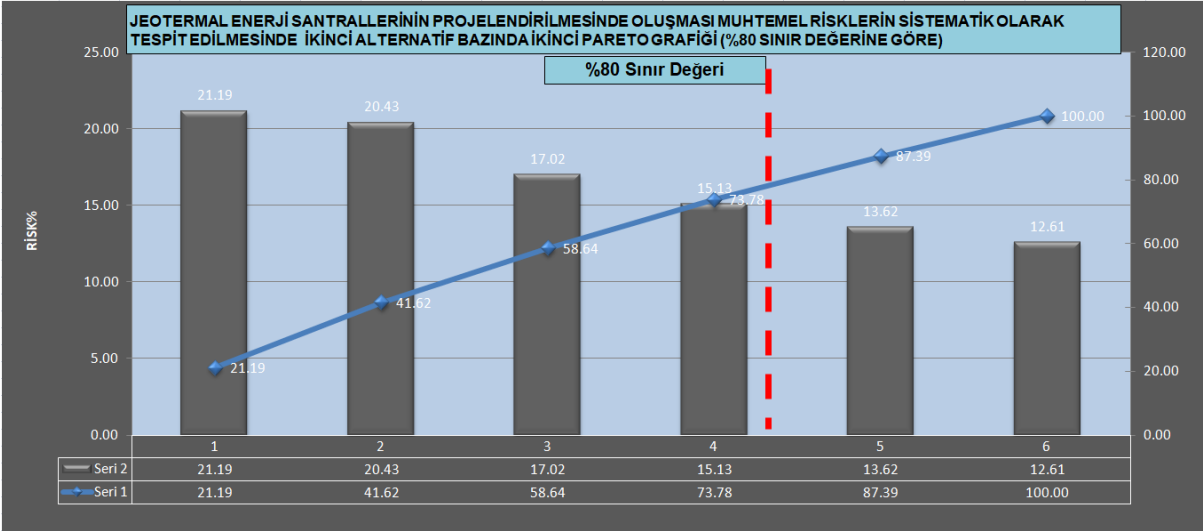
Yapılan bu çalışmada, pareto analizi için ek olarak ikinci bir alternatif düşünülmüştür. Bu projedeki ilk alternatifte, projedeki risklerin dağılımına göre %20-%80=%100, %30-%70=%100, %40-%60=%100 oranlarından %40 Risk Sayısı ile %60 Sınır Değeri=%100 oranı seçilerek toplamın %100 olması önemsenmiştir. Bu sefer ikinci alternatifte ise %20-%80=%100 kuralına göre %80 risk sınır değerinin projedeki hangi risk sayısına denk geldiği araştırılmıştır. Burada %20 Risk Sayısı ile %80 Sınır Değeri=%100 oranlarında %80 Sınır Değeri oranı önemsenmiştir. Buna göre ikinci alternatif araştırmada projedeki %80 sınır değeri ilk 6 risk sayısına denk geldiği görülmüştür. Bu alternatifte önemli olan faktör ise %80 sınır değerinin yakalanması olarak düşünüldüğünde ise JES projeleri için J4,J9,J2,J1,J7,J5 risklerinin ön plana çıktığı görülmektedir (Çizelge 3, Şekil 1). Bu alternatif ile de JES kurulum aşamasında belirlenen risklerin %60'ının, projedeki tüm problemlerin %80'nini oluşturduğu şeklinde yorum yapılabilir. J4,J9,J2,J1,J7,J5 riskleri kendi içinde yine %80 sınır değerine göre ikinci bir pareto analizinde incelendiğinde ise J4,J9,J2,J1 risklerinin ön plana çıktığı görülmektedir (Çizelge 5, Şekil 3). Bu iki alternatifte de amaç projelerdeki en önemli olan ve ayrıca bütün projedeki problemlerin büyük bir yüzdesini oluşturan az sayıda risk için, az bir maliyetle önlemlerin alınması ve projenin ilerlemesinin zarar görmemesi olmaktadır. JES projeleri için her iki alternatifte de iki kere pareto analizi uygulanarak mümkün olduğunca problemin çoğunu oluşturan az sayıda riskin bulunması amaçlanmıştır. Bu şekilde JES projelerinin ilerlemesinde, az sayıda riskin çözümlenerek projedeki problemlerin çoğunun çözümlenmesi olanaklı hale getirilmiştir.

Çizelge 5. Jeotermal enerji santrallerinin projelendirilmesinde oluşması muhtemel risklerin ikinci alternatif bazında ikinci Pareto sistematüğinde incelenmesi (%80 sınır değeri)

Table 5. Investigation of possible risks in the design of geothermal power plants in the second pareto system based on the second alternative (80% limit value)

JEOTERMAL ENERJİ SANTRALLERİNİN PROJELENDİRİLMESİNDE OLUŞMASI MUHTEMEL RİSKLERİN İKİNCİ ALTERNATİF BAZINDA İKİNCİ PARETO SİSTEMATİĞİNDE İNCELENMESİ (%80 Sınır Değeri)						
SIRA NO	HATA ŞEKLİ	PROSES NO	RÖS DEĞERİ	RİSK(%)	KÜMÜLATİF RİSK %	RİSK
1	Jeolojik, jeofizik, jeoteknik, araştırmalarda (zemin koşulları, sıvılaşma, aktif fay konumları, karstik boşluk, vb.), statik analizlerinde, depremsellik, heyelan riski ve zemin parametrelerinin belirlenmesinde yapılan hata ve riskler	J.4	336	21.19	21.19	YÜKSEK RİSK
2	Projelendirme aşamasında santralin araziye aplikasyonu için gerekli olan koordinatların yanlış hesaplanmasından kaynaklanan hata ve riskler	J9	324	20.43	41.62	YÜKSEK RİSK
3	Kurulum yapılacak arazinin haritalarının olmaması veya haritalarda eksiklik ve/veya yanlışlık bulunmasından kaynaklanan hata ve riskler (topoğrafik, yerleşim, bitki örtüsü, jeoloji vb.)	J.2	270	17.02	58.64	YÜKSEK RİSK
4	Kuyuların, santral ve acil durum havuzlarının yeri ve boru hatlarının geçeceği güzergahın koordinat ve kotlarının hesabında yapılan hata ve riskler	J.1	240	15.13	73.78	YÜKSEK RİSK
5	Kurulum yapılacak arazinin ve boru hatlarının geçeceği güzergahın kadastral ölçüm, mülkiyet/kamulaştırma ölçümlerinde yapılan hata ve riskler	J.7	216	13.62	87.39	YÜKSEK RİSK
6	Üretim ve reenjeksiyon kuyularının akış performans ilişkisi, üretim sıcaklığı, kabuklaşma-korozyon ve jeotermal suların kimyasal özelliklerinin açıklanmasında yapılan hata ve riskler	J.5	200	12.61	100.00	YÜKSEK RİSK

(%80 Sınır Değeri Göre)



Şekil 3. Jeotermal enerji santrallerinin projelendirilme ve ölçümlendirilmesinde oluşması muhtemel risklerin ikinci alternatif bazında ikinci Pareto sistematüğindeki grafik gösterimi (%80 sınır değeri)

Figure 3. Graphic display of possible risks in the design and measurement of geothermal power plants in the second Pareto systemic based on the second alternative (80% limit value)

Çalışmanın dördüncü aşamasında ise JES tasarımı aşamasında olası risklerin her birinin, AHP kullanılarak oluşturulan karşılaştırma matrisi ile kriter ağırlığı hesaplanmıştır (Çizelge 6). AHP analizi sonucu elde edilen en yüksek ağırlığa sahip faktör J4 olarak belirlenmiştir. Bu parametreyi sırasıyla J9,J2,J1,J7,J5,J6,J3,J8 ve J10 takip etmektedir. Karşılaştırma matrisi ve ağırlıkların tutarlılık durumlarının tespiti için hesaplanan CR değerinin 0,05 olduğu belirlenmiştir. Bu değer, Saaty tarafından önerilmiş

olan 0,10 değerinden küçük olması bu çalışmada oluşturulan ikili karşılaştırma matrisi sonuçlarının birbirleriyle tutarlı olduklarını göstermektedir (Saaty, 2000).

Çizelge 6. İkili karşılaştırma ve ağırlık matrisi

Table 6. Pairwise comparison and weight matrix

Parametre	J1	J2	J3	J4	J5	J6	J7	J8	J9	J10	Ağırlık
J1	1										0,11
J2	3	1									0,19
J3	1/5	1/5	1								0,03
J4	5	2	5	1							0,26
J5	1/3	1/5	1/3	1/5	1						0,05
J6	1/3	1/7	3	1/7	1	1					0,04
J7	1/3	1/5	5	1/3	1	1	1				0,06
J8	1/5	1/9	1/3	1/9	1/5	1/3	1/5	1			0,02
J9	3	2	6	1/2	3	9	7	9	1		0,22
J10	1/7	1/7	1/3	1/7	1/3	1/3	1/3	1	1/7	1	0,02
λ _{max} :10,75 CI: 0,083333 RI: 1,49 CR: 0,05<0,1 Σ=1.00											

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

JES tasarım aşamasında, kurulum yapılacak arazinin konumu, geometrisi ile jeolojik ve jeofiziksel koşullarının da belirlenmesi önemli bir konu olmaktadır. Bu projelerde, harita, kesit ve jeolojik kesitlerin oluşturulmasında, kurulum yapılacak sahada ve yakın çevresinde gerçekleştirilen arazi gözlem ve çalışmaları, sondaj faaliyetleri, mühendislik ölçmeleri ve tüm bu çalışmaların önceki çalışmalarla birlikte değerlendirilmesinin payı oldukça büyük olmaktadır. Bu çalışmada, JES tasarımının uygulanması sırasında oluşabilecek hata ve riskler HTEA, Pareto ve AHP sistematğinde araştırılmış ve ayrıca oluşan bu hata ve risklere karşı alınması gereken tedbirler, konu ile ilgili uzman kişilerin de görüşleri alınarak belirlenmiştir. Yapılan HTEA sistematik analizinin incelenmesi sonucunda yüksek risk grubunda yer alan hata ve riskler ve risklerin önlemleri belirlenmiş, sonrasında ise Pareto analizi yapılmıştır.

Pareto analizinde ilk alternatif olarak %20-%80=%100, %30-%70=%100, %40-%60=%100 oranlarından, %40 Risk Sayısı ile %60 Sınır Değeri=%100 oranı (toplamın %100 olması önemsenmektedir), bu projedeki oluşması muhtemel risklerin RÖS sayılarına göre uygun bir oran olarak düşünülmüştür. Buna göre; J4,J9,J2,J1 risklerinin JES kurulum projelerinde ön plana çıktığı görülmektedir. Bu alternatif ile JES kurulum aşamasında belirlenen risklerin %40'ının, projedeki tüm problemlerin %60'ını oluşturduğu şeklinde yorum yapılabilir. J4,J9,J2,J1 riskleri kendi içinde yine %60 sınır değerine göre ikinci bir pareto analizinde incelendiğinde ise J4,J9 risklerinin ön plana çıktığı görülmektedir.

Çalışmada ikinci alternatif olan pareto analizi ile %20-%80=%100 kuralına göre bu defa %80 Sınır Değerinin hangi risklerde oluştuğunu görebilmek amaçlanmıştır. İkinci alternatifte önemli olan husus ise %80 oranının hangi risklere denk geldiğinin bulunması olarak düşünülmüştür. Buna göre düşünüldüğünde ise J4,J9,J2,J1,J7,J5 risklerinin ön plana çıktığı görülmektedir. J4,J9,J2,J1,J7,J5 riskleri kendi içinde yine %80 sınır değerine göre yine ikinci bir pareto analizinde incelendiğinde ise J4,J9,J2,J1 risklerinin ön plana çıktığı görülmektedir. JES projeleri için her iki alternatifte de iki kere pareto analizi uygulanarak mümkün olduğunca problemin çoğunu oluşturan az sayıda riskin bulunması amaçlanmıştır. Bu şekilde JES projelerinin ilerlemesinde, az sayıda riskin çözümlenerek projedeki problemlerin çoğunun çözümlenmesi olanaklı hale getirilmiştir.

AHP ile yapılan analiz sonucunda ise hata ve risklerin J4,J9,J2,J1,J7,J5,J6,J3,J8 ve J10 sırasıyla dikkate alınması gerektiği ortaya çıkmıştır. JES kurulum aşaması yürütülürken oluşabilecek olan ve konu ile ilgili uzman kişilerin görüşleri ile belirlenen hata ve risklerin HTEA, Pareto ve AHP yöntemleriyle analizlerinin gerçekleştirilmesi ile bulunan sonuçlar karşılaştırıldığında, J4,J9,J2 ve J1 proses numaralı

hata ve risklerin uygulanan 3 yöntemde de dikkate alınması gerekliliği hatta bu riskler arasında da J4 ve J9 nolu risklerin daha da önem arz ettiği tespit edilmiştir. Bu durum çalışmada belirlenen bulguların birbirleriyle örtüştüğünü göstermektedir. Çalışmada uygulanan yöntemlerin birbiriyle uyumlu sonuçlar üretmesi, uzman kişilerin görüşlerinin güvenilirliğini göstermesi açısından da önem arz etmektedir. Gerçekleştirilen bu çalışma ile JES standart risk analizi inceleme listelerinde asgari düzeyde bulunması gereken risk kriterlerinin oluşturulmasına katkı sağlanmakla birlikte HTEA, Pareto analizi ve AHP yöntemlerinin JES kurulumu risk analizlerinin yapılmasında oldukça güçlü yöntemler olduğu da vurgulanmaktadır.

5. KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Akın, B., 1998, *ISO 9000 Uygulamasında ve İşletmelerde Hata Türü ve Etkileri Analizi*, Bilim Teknik Yayınevi, İstanbul, ss.182.
- Aksoy, N., Şişman, M., 2011, "Jeotermal elektrik santralleri proje yönetimi", *X. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi*, İzmir, ss.291-298, 13-16 Nisan 2011.
- Can, E., 2019, "Analysis of risks that are based on the aerial photography used in photogrammetric monitoring maps for environmental wind power energy plant projects", *Environmental Monitoring and Assessment*, Cilt 191, 746, <http://doi.org/10.1007/s10661-019-7944-8>
- Chin, K. S., Wang, Y. M., Poon Gary Ka, K., Yang, J. B., 2009, "Failure mode and effects analysis using a group-based evidential reasoning approach", *Computers & Operations Research*, Cilt 36, ss. 1768–1779, <https://doi.org/10.1016/j.cor.2008.05.002>
- Feili, H. R., Akar, N., Lotfizadeh, H., Bairampour, M., Nasiri, S., 2013, "Risk analysis of geothermal power plants using Failure Modes and Effects Analysis (FMEA) technique", *Energy Conversion and Management*, Cilt 72, ss. 69-76. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2012.10.027>
- Franco, A., Donatini, F., 2017, "Methods for the estimation of the energy stored in geothermal reservoirs", *J. Phys.: Conf. Ser.* 796 012025, ss 11, <https://doi.org/10.1088/1742-6596/796/1/012025>
- Gökçen, G., Öztürk, H. K., Hepbaşlı, A., 2004, "Geothermal fields suitable for power generation", *Energy Sources*, Cilt 26, Sayı 5, ss. 441-451, <http://doi.org/10.1080/00908310490429722>
- Gürcün, D., Petek, A., 2021, "Jeotermal enerji potansiyelinin SWOT analizi ile değerlendirilmesi: Aydın ili örneği", *Ömer Halisdemir Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, Cilt 14, Sayı 2, ss. 349–364. <http://doi.org/10.25287/ohuibf.695276>.
- Karatop, B., Taşkan, B., Adar, E., Kubat, C., 2021, "Decision analysis related to the renewable energy investments in Turkey based on a Fuzzy AHP-EDAS-Fuzzy FMEA approach", *Computers & Industrial Engineering*, Cilt 151, 106958, <https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106958>
- Koeh, D. C., Muchiri, P., Chemweno, P., 2018, "Risk assessment of critical equipment failure mode. A case study of Olkaria 2 geothermal power plant in Kenya", *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE) e-ISSN: 2278-1684, p-ISSN: 2320-334X*, Cilt 15, Sayı 5 Ver. II (Sep.-Oct. 2018), ss. 63-73, <http://doi.org/10.9790/1684-1505026373>
- Li, Z., Chen, L., 2019, "A novel evidential FMEA method by integrating fuzzy belief structure and grey relational projection method", *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, Cilt 77, ss. 136-147, <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2018.10.005>
- Liu, H.-C., Liu, L., Liu, N., 2013, "Risk evaluation approaches in failure mode and effects analysis: A literature review", *Expert Systems with Applications*, Cilt 40, ss. 828-838, <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2012.08.010>
- Liu, H.-C., Chen X.-Q., You J.-X., Li, Z., 2021, "A new integrated approach for risk evaluation and classification with dynamic expert weights", *IEEE Transactions on Reliability*, Cilt 70, Sayı 1, ss. 163-174, <https://doi.org/10.1109/TR.2020.2973403>.
- Lund, J. W., 1997, "Direct heat utilization of geothermal resources", *Renewable Energy*, Cilt 10, ss. 403–408. [https://doi.org/10.1016/0960-1481\(96\)00097-3](https://doi.org/10.1016/0960-1481(96)00097-3)
- Min, H., 1994, "Location analysis of international consolidation terminal using the AHP", *Journal of Business Logistics*, Cilt 15, Sayı 2, ss. 25-44,

- https://search.library.northwestern.edu/permalink/01NWU_INST/6rv399/cdi_proquest_journals_212603598
- Mutlu, M., Sarı, M., 2017, "Çok kriterli karar verme yöntemleri ve madencilik sektöründe kullanımı", *Bilimsel Madencilik Dergisi*, Cilt 56, Sayı 4, ss. 181-196, <http://www.mining.org.tr/pub/issue/35230/391953>
- Nasruddin, N., Kurniawan, N., Prasetyadi, D., Sherly, 2018, "Critical analysis using FMEA fuzzy logic on geothermal steam turbine system", *AIP Conference Proceedings* 1983, 020031. <https://doi.org/10.1063/1.5046227>
- Özcan, S., 2001, "İstatiksel proses kontrol tekniklerinden pareto analizi ve çimento sanayiinde bir uygulama", *Cumhuriyet Üniversitesi, İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi*, Cilt 2, Sayı 2, ss. 151-174,
- REN21, 2020, "Renewables 2019 global status report", Renewable Enerji Policy Network for the 21st century Paris, France, ss. 336. https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/gsr_2019_full_report_en.pdf, ziyaret tarihi:02 Ağustos 2021.
- Saaty, T. L., 1980, *The Analytic Hierarchy Process*, New York: McGraw Hill, International, Translated to Russian, Portuguese, and Chinese, Revised, Pittsburgh: RWS Publications.
- Saaty, T. L., 2000, *Fundamentals of decision making and priority theory*. 2. Edition, RWS Publications, Pittsburgh.
- Saaty, T. L., 2013, *Mathematical principles of decision making: the complete theory of the analytic hierarchy process*, USA: RWS Publications.
- Sarıçalı, G., Kundakçı, N., 2016, "AHP ve Copras yöntemleri ile otel alternatiflerinin değerlendirilmesi", *International Review of Economics and Management*, Cilt 4, Sayı 1, ss. 45-66, <https://doi.org/10.18825/irem.00736>
- Su, X., Deng, Y., Mahadevan, S., Bao, Q., 2012, "An improved method for risk evaluation in failure modes and effects analysis of aircraft engine rotor blades", *Engineering Failure Analysis*, Cilt 26, ss. 164-174, <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2012.07.009>
- Şimşek, Y., 2014, *Risk Management Approach And Risk Analysis İn Solar Thermal Energy Projects*, M.Sc Thesis, ITU Energy Institute Department of Energy Science and Technology, ss. 106.
- TJD, 2021, "Jeotermal enerji nedir", Türkiye Jeotermal Derneği <http://www.jeotermaldernegi.org.tr/sayfalar-Jeotermal-Enerji-Nedir->, ziyaret tarihi:02 Ağustos 2021.
- Tsai, S.-B., Yu, J., Ma, L., Luo, F., Zhou, J., Chen, Q., Xu, L., 2018, "A study on solving the production process problems of the photovoltaic cell industry", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Cilt 82, ss. 3546-3553. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.10.105>
- Vaidya, O. S., Kumar, S., 2006, "Analytic hierarchy process: an overview of applications", *European Journal of Operational Research*, Cilt 169, ss. 1-29, <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2004.04.028>
- Wang, Y. M., Chin, K. S., Poon Gary Ka, K., Yang, J. B., 2009, "Risk evaluation in failure mode and effects analysis using fuzzy weighted geometric mean", *Expert Systems with Applications*, Cilt 36, ss. 1195-1207, <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2007.11.028>
- Xiao, N., Huang, H. Z., Li, Y., He, L., Jin, T., 2011, "Multiple failure modes analysis and weighted risk priority number evaluation in FMEA", *Engineering Failure Analysis*, Cilt 18, ss. 1162-1170, <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2011.02.004>
- Zhang, H.-J., Zhou, Y., Gan, Q.-H., 2019, "An extended PROMETHEE-II-based risk prioritization method for equipment failures in the geothermal power plant", *International Journal of Fuzzy Systems*, Cilt 21, ss. 2490-2509, <https://doi.org/10.1007/s40815-019-00679-x>